



# Représentation du langage et modèles d'évolution linguistique : la grammaticalisation comme perspective

Quentin Feltgen, Benjamin Fagard, Jean-Pierre Nadal

## ► To cite this version:

Quentin Feltgen, Benjamin Fagard, Jean-Pierre Nadal. Représentation du langage et modèles d'évolution linguistique : la grammaticalisation comme perspective. *Revue TAL*, 2015, 55 (3), pp.47-71. halshs-01241353

**HAL Id: halshs-01241353**

**<https://shs.hal.science/halshs-01241353>**

Submitted on 10 Dec 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Représentation du langage et modèles d'évolution linguistique : la grammaticalisation comme perspective

Quentin Feltgen<sup>a</sup> — Benjamin Fagard<sup>b</sup> — Jean-Pierre Nadal<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire de Physique Statistique (LPS, UMR 8550 CNRS – ENS – UPMC – Université Paris Diderot), Ecole Normale Supérieure, Paris*

<sup>b</sup> *Laboratoire Langues, Textes, Traitements informatique, Cognition (LaTTiCe, UMR 8094 CNRS - ENS - Université Paris 3), Ecole Normale Supérieure, Paris*

<sup>c</sup> *Centre d'Analyse et de Mathématique Sociales (CAMS, UMR 8557 CNRS - EHESS), Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris*

---

**RÉSUMÉ.** Bien que le changement linguistique ait fait l'objet de nombreuses recherches numériques, les phénomènes diachroniques de renouvellement linguistique et plus spécifiquement la grammaticalisation ont été, semble-t-il, laissés de côté. Motivés par d'autres perspectives, les différents modèles s'appuient sur des représentations qui, comme nous le montrons, ne permettent pas d'aborder efficacement la modélisation de ce type de phénomènes. Nous proposons ici un cadre de représentation visant à décrire le renouvellement linguistique et se prêtant bien à la simulation numérique. Nous l'illustrons par une implémentation particulière mettant en évidence le phénomène de javellisation sémantique.

**ABSTRACT.** Though numerous numerical studies have investigated language change, grammaticalization and diachronic phenomena of language renewal have been left aside, or so it seems. We argue that previous models, dedicated to other purposes, make representational choices that cannot easily account for this type of phenomenon. In this paper we propose a new framework, aiming to depict linguistic renewal through numerical simulations. We illustrate it with a specific implementation which brings to light the phenomenon of semantic bleaching.

**MOTS-CLÉS :** grammaticalisation ; changement linguistique ; évolution du langage ; modélisation numérique.

**KEYWORDS:** grammaticalization ; linguistic change ; language evolution; numerical modeling.

---

## 1. Introduction

Il ne peut y avoir de modèle numérique du changement linguistique, sans que celui-ci ne se fonde sur une représentation particulière du langage, que celle-ci soit élémentaire, ou extrêmement élaborée. Or, la question du changement est une question, assurément, délicate ; et, pour l'étudier, il semble donc nécessaire de se doter d'une représentation du langage tout spécialement adéquate. Il s'agit d'une question délicate pour la raison suivante : le renouvellement linguistique n'est pas un événement ; c'est un processus permanent (Aitchison, 1991). S'il est permanent, c'est parce que le langage, de quelque manière qu'on le considère, change, dès lors qu'il est parlé, utilisé, compris, interprété, écrit, ou même plus simplement encore, dès lors que l'individu, seul avec sa pensée, réfléchit, et tisse le fil de ses réflexions à partir du langage. Tout acte de langage répond à une situation nouvelle, à des enjeux nouveaux (Croft, 2000, Chap. IV), et mobilise ainsi les différentes ressources de la langue d'une manière chaque fois inédite. Représenter le langage comme perpétuel changement suppose donc de mettre en œuvre une représentation elle-même évolutive, qui s'adapte à son objet d'étude, tout en le manifestant toujours de manière intelligible.

La littérature récente offre une grande diversité de représentations, qui permettent chacune de saisir un aspect différent du changement linguistique. Si la majorité des modèles cherchent à rendre compte de l'émergence d'une convention linguistique, le renouvellement linguistique, ou comment la langue « fait du neuf avec l'ancien dans un mouvement d'intégration continu et ce à tous les niveaux » (Melis et Desmet, 1998), a généralement été laissé de côté. Il s'agit alors de s'interroger sur les continues perturbations qui entraînent la constante redéfinition du consensus, c'est-à-dire de considérer comment une langue déjà constituée est amenée à subir en permanence des modifications au cours de son histoire. C'est justement l'aspect du changement linguistique pour lequel la représentation souffre le plus directement des difficultés que nous avons mentionnées plus haut.

Dans cet article, nous discutons de la manière par laquelle représenter le langage dans les modèles, de sorte que son caractère éminemment versatile soit introduit le plus naturellement et le plus simplement possible. Nous commencerons (Section 2) par introduire le concept de grammaticalisation (Hopper et Traugott, 2003), et souligner tant son importance pour la question du changement linguistique, que les difficultés qu'il soulève ; puis nous passerons brièvement en revue les principaux modèles numériques du changement linguistique (Section 3), en les classant selon leurs choix de représentation, afin de mieux discuter leurs possibilités et limitations vis-à-vis de la question du renouvellement linguistique. Nous présenterons ensuite un modèle numérique spécifiquement dédié à l'étude théorique du renouvellement linguistique (Section 4), que nous illustrons par l'exemple de la javellisation sémantique (Section 5).

## 2. La grammaticalisation

La grammaticalisation est le processus par lequel le matériau grammatical d'une langue donnée se trouve renouvelé et remodelé à partir du matériau lexical de cette langue. En français, la préposition *chez*, par exemple, s'est formée à partir d'un lexème issu du latin *casa*. Cependant, on a coutume d'étendre cette définition à tout processus de changement linguistique aboutissant à une intensification de la qualité grammaticale d'un des objets dont il affecte l'évolution (Campbell et Janda, 2000). Ainsi, la tendance actuelle du français à réanalyser le pronom personnel sujet comme une marque obligatoire de flexion verbale, conduisant à la répétition du sujet (ex : moi je sais pas, le chat il vient miauler tous les matins, etc.), peut tout à fait être considérée comme une grammaticalisation. L'évolution syntaxique elle-même peut parfois entrer dans le cadre de la grammaticalisation : lorsqu'on passe, entre l'ancien et le moyen français, d'un ordre des mots essentiellement libre, marquant le thème de l'énoncé en le situant en première position de la phrase, à un ordre des mots plus rigide, indicateur des relations grammaticales entre éléments, on peut considérer que l'ordre syntaxique en vient à revêtir, au cours de ce processus, une fonction plus grammaticale.

### 2.1. La question de la grammaticalisation

L'importance de la grammaticalisation est considérable, tant par la multitude de cas dont elle fait sens, en soulignant leur téléologie commune, que pour la portée universelle de sa pertinence : il n'existe pas une seule langue, une seule époque, qui n'illustre la grammaticalisation par de nouveaux exemples. Son rôle dans le renouvellement du langage intervient, on l'a vu, à tous les niveaux de la langue. Mais cette extension formidable n'est pas sans contrepartie : il devient difficile d'en circonscrire les limites, d'apercevoir les régularités de son fonctionnement. L'une des principales pierres d'achoppement de la grammaticalisation se situe dans la dualité qu'elle suppose entre un pôle lexical et un pôle grammatical<sup>1</sup> avec, entre les deux, une succession de nuances intermédiaires (Marchello-Nizia, 2006, pp. 51-53), généralement considérée comme un continuum. Cette vision du langage rencontre un assentiment relativement général ; en revanche, la définition de la qualité grammaticale qu'elle met en jeu ne donne pas lieu à un consensus clair (Himmelmann, 2004).

Ce problème est exacerbé par la dissociation entre la *forme* (c'est-à-dire tout élément du langage : il peut s'agir d'un mot, d'un morphème, d'un accent prosodique, d'une structure syntaxique), qui nous apparaît explicitement, et la *fonction* qu'elle peut

1. D'autres distinctions intéressantes ont parfois été proposées : entre éléments conceptuels et éléments procéduraux (Blakemore, 1987), entre éléments autosémantiques et éléments synsémantiques (Marthelot, 2012, pp. 64-65 et 176-177) ; Ludo Melis et Piet Desmet mentionnent également un troisième pôle, le pôle discursif (Melis et Desmet, 1998), afin de rendre compte des marqueurs discursifs comme *décidément*, qui n'appartiennent pas clairement à l'un ou l'autre pôle. Cette richesse conceptuelle suggère que l'opposition lexical/grammatical ne serait qu'une projection unidimensionnelle possible d'un paysage cognitif plus complexe.

remplir. En effet, l'existence même de la grammaticalisation montre bien que la grammaticalité d'une forme n'est pas un objet défini, puisqu'elle est constamment appelée à évoluer ; il est possible, en revanche, de parler de la grammaticalité d'une fonction. Lors de la grammaticalisation, s'il y a changement de grammaticalité de la forme, c'est parce qu'elle vient à être associée à une fonction elle-même plus grammaticale. Ainsi, on ne peut pas dire que la structure syntaxique soit plus grammaticale que la flexion morphologique : dans les langues synthétiques, elle ne l'est vraisemblablement pas, mais le devient dans les langues analytiques. Or, les fonctions étant elles-mêmes souvent difficiles à définir, la notion de leur grammaticalité l'est plus encore, et c'est pourquoi il n'est pas toujours aisé de distinguer rigoureusement la grammaticalisation, d'autres processus de changement fonctionnel. Il est cependant accepté qu'une majorité de ces changements constituent en fait bel et bien des instances de grammaticalisation : l'étude de la variation fonctionnelle des formes fournit donc un point de départ satisfaisant à l'étude de la grammaticalisation. C'est pourquoi, dans ce travail, nous nous focaliserons sur celle-ci – une dilection qui nous permettra d'éviter la question, épineuse, de la grammaticalité des fonctions.

## 2.2. *La spécificité de la grammaticalisation*

Les processus regroupés sous la catégorie de grammaticalisation ont-ils, par leurs mécanismes, par les phénomènes qui les accompagnent, une similitude plus prononcée que le résultat de leur évolution ? Autrement dit, la grammaticalisation constitue-t-elle un processus d'innovation spécifique et indépendant ? La question n'est pas tranchée, mais se nourrit parfois de désaccords terminologiques tacites (Prévost, 2003).

La position majoritaire consiste à poser que certaines instances de grammaticalisation en constituent des exemples prototypiques. Ainsi du renouvellement de la négation en français : l'adverbe *pas* en est aujourd'hui la marque principale, tandis que l'ancien *non* latin, phonétiquement érodé en *ne*, et avec lequel *pas* s'était longtemps combiné, a tendance à disparaître de la langue parlée. On peut déduire de ce type d'exemples certains traits récurrents de la grammaticalisation : changement de comportement syntaxique, javellisation sémantique (définie plus loin), augmentation de fréquence de la forme nouvelle. Au sein même de cette position, les attitudes peuvent varier : pour (Melis et Desmet, 1998), la grammaticalisation est reléguée au rang d'épiphénomène, parce qu'elle subsume un certain nombre de processus qui « affectent de manière analogue divers domaines et ce non de manière téléologique » et dont aucun ne semble lui être rigoureusement nécessaire. Sans nier la pluralité de ces processus, (Marchello-Nizia, 2006, p. 87) leur reconnaît néanmoins une familiarité commune ; la grammaticalisation est alors tenue pour un phénomène à part entière, distingué « par une combinaison de caractères spécifiques ».

Certains auteurs, au contraire, proposent de considérer que tous les processus de grammaticalisation peuvent être regroupés sous l'égide d'un seul processus de changement linguistique ; en ce cas, il existe certes un processus unique responsable de la grammaticalisation, mais il n'est ni spécifique, ni indépendant. Ainsi, la grammatica-

lisation a pu être vue comme un sous-cas spécifique de la réanalyse (Harris et Campbell, 1995 ; Croft, 2000 ; Peyraube, 2002), mais le concept de réanalyse ne recouvre pas les mêmes réalités d'un auteur à l'autre : il s'agit tantôt du redécoupage syntaxique interne d'une construction, tantôt de la révision du rapport entre forme et fonction réalisé par une unité. (Fischer, 2011) voit la grammaticalisation et la réanalyse (à laquelle elle réduit en fait la première) comme des illusions diachroniques ne correspondant à aucun processus cognitif réel, et attribue à tout changement linguistique une nature analogique.

Il semble donc que l'on ait affaire ici à une controverse théorique sérieuse : la grammaticalisation est vue, d'un côté, comme un agrégat de processus divers et non-nécessaires, de l'autre, comme un cas particulier, distingué par les domaines d'appartenance respectifs de l'élément cible et de l'élément source, d'un processus plus générique de changement linguistique. Dans le premier cas, la grammaticalisation paraît se noyer dans la diversité de ses multiples hypostases, dans le second, elle s'efface au profit d'un mécanisme plus général. Un tel contraste semble s'expliquer par le fait que la notion même de processus ne correspond pas à la même réalité chez les uns et chez les autres, tantôt macro-processus diachronique, tantôt micro-processus cognitif. La discussion et la réflexion sont en outre rendues difficiles du fait que les notions mises en jeu dans le débat souffrent toutes d'une polysémie qu'il est parfois difficile de démêler ; et la grammaticalisation interfère, par surcroît, avec un florilège d'autres processus comme la lexicalisation, la paradigmatisation, la conventionalisation, la pragmaticisation, la subjectivation, l'idiomaticisation, la constructionnalisation, etc., dont on ignore dans quelle mesure et de quelle manière ils lui sont liés.

Cette profusion terminologique et conceptuelle reflète le caractère irrésolu de certaines questions cruciales de la linguistique diachronique. Par exemple, comment les pratiques des locuteurs, essentiellement incontrôlées et machinales, peuvent-elles donner lieu à des changements d'organisation structurelle de la langue qui prennent place, de manière cohérente, sur plusieurs siècles parfois ? Comment se fait-il qu'un changement, sur le point de se produire, ait pu vaciller durant des décennies avant de se dérouler tout à fait ? Ces questions ont trait, pour l'essentiel, à l'articulation délicate entre les processus cognitifs des individus, leurs motivations pragmatiques, leurs limitations neurologiques, et l'organisation complexe de la langue, le statut de ses différents éléments, la perméabilité de ses catégories.

### **2.3. Méthodologie**

Face à cette situation, la modélisation numérique offre un espace de discussion alternatif. En effet, un algorithme ne peut opérer qu'à partir d'objets clairement définis, et selon une procédure qui ne tolère pas l'ambiguïté ; à tous les aspects de la représentation du langage et des mécanismes de changement impliqués dans un modèle donné correspondent des instructions claires, des objets rigoureusement spécifiés, qui permettent d'explicitier entièrement le contenu des notions mises en jeu.

Nous adopterons ici une méthodologie dans l'esprit de (Fischer, 2008), à savoir que nous ne chercherons pas à rendre compte de la distinction lexical/grammatical, problématique, pour nous focaliser plutôt sur les micro-processus cognitifs mis en jeu lors des processus de grammaticalisation. Notre approche sera de plus essentiellement théorique, dans le sens où nous ne chercherons pas à décrire un exemple historique particulier de grammaticalisation. Il ne s'agira donc pas tant de chercher à modéliser la grammaticalisation en tant que telle, que de simuler des processus cognitivement plausibles de compétition entre formes, pouvant éventuellement donner lieu à une grammaticalisation, et donc d'articuler la sphère des motivations individuelles à l'organisation macroscopique de la langue (Schelling, 1978 ; Lüdtke, 1986), dans une approche de type « main invisible » (Keller, 1989).

Les processus de changement linguistique nous semblent mettre en jeu trois types d'éléments de nature différente : les unités linguistiques (mots, morphèmes, constructions, etc.), que nous avons appelées *formes* ; les fonctions cognitives locutoires et illocutoires réalisées lors de la communication (dénoter un objet particulier, décrire une action, ordonner, interroger, nier, suggérer, indiquer une relation entre différents éléments, orienter l'attention vers un aspect spécifique de la scène ou du discours, etc.), portées par les formes ; les contextes dans lesquels ces fonctions se trouvent réalisées. Ces contextes sont eux-mêmes complexes et multidimensionnels, et doivent être considérés comme la conjonction de caractères divers : linguistiques, mais également pragmatiques, sociologiques, etc. L'importance de cette dimension contextuelle pour la grammaticalisation, et pour le changement linguistique en général, a été plusieurs fois soulignée, d'un point de vue théorique (Traugott et Dasher, 2001 ; Heine, 2002 ; Diewald, 2006) autant qu'à travers d'études sur corpus (Kroch, 1989 ; Marchello-Nizia, 2011 ; Fagard et Combettes, 2013).

Par ailleurs, les processus de changement linguistique qui nous intéressent ici sont des processus diachroniques, qui ne se précisent que sur des échelles de temps suffisamment longues (un processus de grammaticalisation pouvant s'étaler sur quelques décennies, voire plusieurs siècles) ; pour cette raison, les corpus de textes, de type Frantext (ATILF, 2014), constituent la voie d'accès privilégiée à leur étude.

### 3. Typologie des modèles numériques du changement linguistique

Nous exposons ici une brève synthèse des différentes représentations du langage mobilisées dans les simulations numériques du changement linguistique, afin de justifier la nécessité d'introduire un nouveau modèle. Le but n'est pas ici d'être exhaustif, mais de donner un aperçu des principales tendances rencontrées, et d'illustrer leur diversité. On pourra se référer utilement à des travaux de synthèse plus exhaustifs (Christiansen et Kirby, 2003 ; Castellano *et al.*, 2009 ; Vogt et De Boer, 2010 ; Steels, 2011 ; Baronchelli *et al.*, 2012).

### 3.1. Modèles sémiologiques : le langage comme code

Les modèles que nous appellerons *sémiologiques* partagent un même patron très simple, qui repose essentiellement sur un principe de correspondance (non nécessairement univoque) entre des éléments de langage d'un côté (formes, mots, noms, signifiants, morphèmes, signaux, expressions, sons, etc.), et, de l'autre, des aspects de réalité (objets, signifiés, concepts, événements, etc.) ou bien, des fonctions particulières associées à la communication interindividuelle (intentions pragmatiques, négation, interrogation, informations, significations, etc.). Le langage est alors décrit comme une relation de type sémiologique entre ces deux ensembles.

Cette relation peut prendre différentes formes. Le modèle de Christina Pawlowitsch (Pawlowitsch *et al.*, 2011) décrit le changement linguistique comme un jeu évolutionnaire. La relation langage/réalité est figurée par une paire de matrices appelée le potentiel communicatif, l'une des matrices représentant la production, indiquant quel signe produire pour communiquer une information donnée, l'autre la réception, qui, à tout signal reçu, associe l'information perçue. La formulation déterministe du modèle exclut néanmoins les possibilités de synonymie lors de la production, et de polysémie lors de la compréhension. Chaque paire de matrices représente différents langages possibles ; la population des locuteurs est décrite par la proportion d'individus ayant adopté chacune des paires (ex : si le modèle définit trois langages  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$ , alors la population sera décrite par l'ensemble  $(x_1, x_2, x_3)$ , où  $x_i$  désigne la proportion d'individus ayant adopté le langage  $L_i$ ).

Les travaux de Nowak (Nowak et Krakauer, 1999), partagent avec le modèle précédent un même schéma (y compris la définition du langage comme potentiel communicatif), mais privilégient un encodage et un décodage probabilistes. Une syntaxe schématique est également proposée : les événements exprimés par le langage peuvent être décrits par un couple ordonné {nom ; prédicat} ; ainsi, le lexique est structuré en deux catégories de mots, les uns désignant les objets de la réalité, les autres les actions associées à ces mêmes objets. La grammaire de la langue n'intervient donc pas comme une caractéristique émergente de celle-ci, elle est spécifiée à l'avance<sup>2</sup>.

Le modèle d'apprentissage itéré (*Iterated Learning Model*) de Simon Kirby (Kirby, 2001), bien que très différent dans la dynamique qu'il propose et dans les objectifs qu'il se donne, repose lui aussi sur un jeu de significations discrètes, auxquelles est associé un signal linguistique spécifique. Ces significations se décomposent en différents traits sémantiques : formellement, pour  $n$  traits sémantiques, les différentes significations possibles sont données par les nœuds d'un réseau hypercubique de dimension  $n$ . Les signaux linguistiques associés à chacune des significations possibles reflètent, par compositionnalité, leur structure sémantique interne : si deux significations partagent certains traits sémantiques, leurs signaux associés présenteront

2. En revanche, qu'une langue grammaticale (c'est-à-dire, pour laquelle les événements ne sont pas désignés par bloc, mais par compositionnalité à partir du couple {nom ; prédicat} qui le compose) soit privilégiée par rapport à une langue purement lexicale apparaît comme une conséquence émergeant de la dynamique évolutionniste du modèle.



certaines similitudes, par exemple des phonèmes communs. La structure linguistique découle alors d'un principe de motivation relative dans la constitution du signe. Par ailleurs, l'asymétrie entre la production et la compréhension, si elle subsiste dans le détail de la dynamique, n'intervient plus au niveau de la représentation du langage. Un modèle précédent (Kirby, 2000) inclut également une structure syntaxique : les traits sémantiques y relèvent de deux classes, les objets et les actions ; une phrase (une signification, dans la terminologie du modèle) étant composée d'un agent, d'un patient, et d'une action entre les deux.

Le *Naming Game*, proposé par Luc Steels (Steels, 1995), définit un protocole de négociation entre agents, afin que ceux-ci s'accordent sur une relation majoritairement biunivoque entre des mots (générés arbitrairement) et des significations (dans l'article original, un jeu restreint de directions spatiales, et le nom associé aux agents eux-mêmes). Du point de vue de la représentation du langage, ce modèle diffère des précédents en ce que la relation entre les mots et les objets prend la forme d'un ensemble de répertoires : à chaque objet est associé un répertoire de noms possibles. Ce modèle a le mérite de montrer comment des mécanismes simples, sur la seule base d'échanges successifs et d'un petit nombre de signaux métalinguistiques (pointage, confirmation et infirmation), suffisent à faire émerger un consensus sur le choix d'un vocabulaire et sur la signification des mots. Initialement implémenté dans des robots, le *Naming Game* a donné lieu à de nombreux travaux explorant différentes facettes et extensions, bien au-delà de la seule sphère de l'intelligence artificielle. Cette approche s'étend par ailleurs à l'émergence d'une structure grammaticale (Steels, 2005). La représentation du langage mise en jeu peut alors devenir bien plus complexe qu'une simple mise en relation entre deux ensembles discrets.

Parmi les développements du *Naming Game*, mentionnons à titre illustratif le *Category Game* (Puglisi *et al.*, 2008) : les agents doivent organiser leurs perceptions d'un espace continu en catégories afin de pouvoir les désigner linguistiquement. L'exemple traité est celui du spectre de la lumière visible, les catégories opérées correspondant alors aux couleurs. Cette variante a ceci de particulièrement intéressant qu'elle prend en compte le processus d'élaboration des objets du langage, et présente une interaction subtile entre cette élaboration, et la communication entre pairs. Celle-ci donne d'ailleurs lieu à des phénomènes remarquables, notamment l'émergence d'un petit nombre de catégories linguistiques communes à l'ensemble des agents, alors que ceux-ci, considérés individuellement, découpent le spectre lumineux en un nombre beaucoup plus élevé de catégories perceptuelles, qui leur sont subsumées.

Une autre approche intéressante, fondée sur les théories du linguiste William Croft (Croft, 2000), s'inspire des modèles à exemplaires développés en phonologie (Pierrehumbert, 2001) : c'est le modèle de sélection des énoncés, *Utterance Selection Model* (Baxter *et al.*, 2006). Il a notamment montré sa pertinence sur l'étude de l'émergence de l'anglais néozélandais (Baxter *et al.*, 2009). La représentation du langage se résume dans ce modèle à une signification unique (fonction), que peuvent exprimer différentes constructions (formes). Evidemment, cette représentation est théoriquement appelée à s'étendre à un nombre arbitrairement grand de fonctions différentes,

bien qu'aucune piste en ce sens ne soit suggérée par les auteurs. L'intérêt de ce modèle, c'est que l'accent n'est pas mis tant sur la relation forme-fonction que sur les fréquences d'utilisation des différentes formes pour l'expression d'une fonction donnée. Le locuteur n'enregistre pas simplement des liens entre deux ensembles discrets, mais les occurrences multiples de chaque forme. Les effets de fréquence sont ainsi considérés comme partie constituante de la représentation du langage adoptée.

Présentons pour terminer cette première série le modèle de Bernard Victorri (Victorri, 2004), dont l'originalité repose sur la représentation des sens possibles dans un espace sémantique, continu et multidimensionnel. L'espace phonétique par lequel se réalisent les unités linguistiques est également continu. Une unité linguistique — qui correspond à ce que nous appelons une *forme* — consiste ici en une application reliant une distribution de probabilité dans l'espace sémantique à une distribution de probabilité dans l'espace phonétique. Le modèle, s'il s'inspire des modèles d'agents, se place dans l'approximation de « l'agent représentatif », et ne prend donc pas en compte le détail des interactions sociales. Il se révèle tout particulièrement intéressant en ce que les sens des formes (la distribution associée dans l'espace sémantique) et les sens que les locuteurs cherchent à exprimer sont disjoints : ces derniers sont également caractérisés par une distribution dans l'espace sémantique, mais il s'agit d'une gaussienne d'écart type plus ou moins grand selon que le sens exprimé s'avère ou moins vague. La probabilité de choisir une forme pour convoier ce sens est proportionnelle au recoupement entre les deux distributions. La distribution sémantique de la forme choisie est ensuite modifiée pour tenir compte de l'usage qui en a été fait. Ce modèle permet ainsi de tenir compte de l'évolution sémantique des unités du langage, à travers l'usage qui en est fait ; il décrit par ailleurs comment une forme peut devenir, par cet usage, polysémique, ou développer des sens disjoints qui conduisent à une homonymie. Le langage, ou tout du moins, la délimitation particulière de l'espace sémantique que définit son lexique, est donc décrit comme un état de perpétuelle évolution.

### 3.2. *Modèles holistiques : le langage comme totalité*

Nous considérons à présent des représentations du langage que nous qualifierons d'holistiques, du fait que le langage y est considéré comme un tout, sans référence à des ensembles discrets ou continus d'objets et de noms. En ce cas, les locuteurs changent de langue au lieu de changer la langue. D'une manière intéressante, on a vu que les modèles de type « théorie des jeux », s'ils spécifient le contenu de ces langues, les considèrent comme holistiques du point de vue de la dynamique.

Parmi ces modèles, on distingue deux catégories principales : les modèles atomiques, et les modèles paramétriques. Les modèles atomiques s'appuient sur une représentation minimale du langage, celui-ci étant considéré comme un tout indécomposable. Différentes langues peuvent coexister au sein d'une communauté mais, parce que celles-ci sont monolithiques, il n'est pas possible de définir une distance entre elles, et les locuteurs passent de l'une à l'autre sans transition. Cette hypothèse correspond en fait à une vision macroscopique simplifiée de la pluralité linguistique, qui

exclut tout transfert d'une langue à l'autre, et néglige donc tout phénomène de contact et d'emprunt. Elle a été proposée notamment pour décrire l'extinction des langues (Abrams et Strogatz, 2003), lorsque la langue d'une population donnée est adoptée par une autre population (ou lui est imposée), généralement dans une situation d'asymétrie politique entre celles-ci. Des extensions de ce modèle considèrent en outre la possibilité de locuteurs bilingues, et définissent de manière ad hoc une notion de similarité entre différentes langues (Mira et Paredes, 2005). Certains modèles d'agents peuvent aussi être décrits à travers une représentation atomique (Castelló *et al.*, 2009).

Les modèles paramétriques s'appuient sur des hypothèses toute différentes. Dans l'esprit de la théorie des « principes et paramètres », la langue est définie par sa grammaire nucléaire, c'est-à-dire l'ensemble des règles syntaxiques qui régissent la validité de ses énoncés. Ces règles peuvent être formalisées comme l'activation ou non d'un nombre fini de paramètres binaires (Pinker, 1979) ; le nombre de grammaires nucléaires différentes étant alors lui-même fini, celles-ci peuvent donc être théoriquement listées de manière exhaustive. Ces paramètres ne sont pas toujours spécifiés et, s'ils ne le sont pas, le modèle devient atomique ; les différents langages ne correspondent plus à des langues parlées par différentes populations, mais aux différentes grammaires nucléaires possibles. Ils sont alors représentés par les éléments discrets d'un ensemble fini, sans référence particulière aux règles de composition de cet ensemble. Là encore, une notion de similarité entre grammaires peut être introduite, toujours de manière ad hoc (Nowak *et al.*, 2001).

Le modèle de Partha Niyogi et Robert Berwick (Niyogi et Berwick, 1997) va plus loin dans les détails de la représentation. Il définit l'ensemble des phrases possibles, et chaque langage est décrit comme une distribution de probabilité d'énonciation sur cet ensemble de phrases. Celles-ci sont modélisées par un ensemble d'éléments discrets arbitraires indépendants, et les différentes grammaires se caractérisent par une distribution uniforme sur un sous-ensemble de ces éléments. Le langage est ainsi lui-même représenté comme un sous-ensemble d'un ensemble plus vaste, mais fini, d'énoncés possibles et équiprobables.

Pour terminer, nous évoquerons brièvement le modèle de Ted Briscoe (Briscoe, 2002). De la même manière que dans le modèle de Niyogi et Berwick dont il s'inspire, ce modèle représente le langage par une grammaire nucléaire correspondant à un répertoire de phrases possibles (i.e. syntaxiquement valides). Le paramétrage est explicite : un langage (grammaire) est ainsi défini par un jeu de 20 variables ternaires. De plus, ces paramètres sont spécifiés. Les phrases du modèle ne sont plus caractérisées par un ensemble d'éléments arbitraires, mais par une succession ordonnée d'éléments dont la catégorie grammaticale est spécifiée (ex :  $NP_1 (S \setminus NP_2) / NP_1 NP_2$ ). Ce modèle offre donc une représentation du langage plus riche sur le plan syntaxique, mais spécifique au cadre théorique de la grammaire catégorielle.

### 3.3. Paradigmes du changement linguistique

Parmi les modèles précédents, on rencontre quatre paradigmes du changement linguistique : les modèles d'émergence, d'évolution, d'apprentissage, et de compétition ; aucun de ces domaines n'étant nettement isolé des trois autres, il s'agit plutôt de tendances plus ou moins marquées, que de prises de position radicales.

Les modèles d'émergence mettent l'accent sur la possibilité, pour une communauté d'agents, d'aboutir à une convention stable et définitive par le biais de négociations successives. Le *Naming Game* constitue le prototype évident de cette catégorie, notamment parce qu'il a été conçu, à l'origine, pour être implémenté dans des intelligences artificielles en interaction (Steels, 1999). Cependant, la quasi-totalité des modèles précédemment mentionnés mettent également en jeu d'une manière plus ou moins prééminente l'émergence d'une convention collective, à l'exception peut-être des modèles de Niyogi, de Briscoe, et des modèles de compétition. Les modèles d'émergence permettent, outre de doter les intelligences artificielles d'algorithmes servant à construire un langage cohérent afin de décrire les informations extraites de leur environnement, de tester différentes hypothèses sur les origines du langage humain lui-même, domaine d'étude par ailleurs en pleine expansion.

Les modèles d'évolution considèrent le changement linguistique comme un épiphénomène de l'évolution naturelle de l'espèce humaine. Dans cette perspective, certains langages, parce qu'ils permettent de communiquer plus efficacement avec les membres de la communauté, confèrent à leurs locuteurs un avantage sélectif tantôt intrinsèque, tantôt lié à la capacité de communiquer avec les autres membres de la population et donc fonction de sa composition. Cet avantage permettra notamment aux locuteurs d'un langage donné d'avoir une descendance plus nombreuse. Les enfants apprenant le langage de leurs parents, la proportion d'individus dans la population parlant les langages les plus avantageux augmentera logiquement avec le temps — d'où l'émergence d'une convention collective comme effet secondaire du phénomène évolutif principal. Les modèles de Martin Nowak, qu'ils soient holistiques ou non, constituent un exemple particulièrement illustratif de cette catégorie.

Les modèles d'apprentissage introduisent le changement comme une conséquence de la transmission du langage d'une génération à l'autre. Dans les modèles de Niyogi et de Briscoe, le changement linguistique intervient à travers l'argument de la "pauvreté du stimulus" : la nouvelle génération observe les phrases prononcées par les adultes, mais ces phrases n'épuisent pas le sous-ensemble des phrases possibles qui définit leur langage. Aussi, cet échantillon ne permet-il pas d'inférer avec certitude les paramètres qui l'ont généré ; pour cette raison, le langage de la nouvelle génération peut ne pas être identique à celui de la génération précédente, et les imperfections dans l'apprentissage sont donc susceptibles d'introduire un écart avec une convention collective préalablement établie. Le modèle d'apprentissage itéré de Simon Kirby, lui aussi fondé sur la transmission du langage, adopte une perspective bien différente : au lieu de chercher à comprendre comment le changement peut advenir naturellement dans un cadre théorique générativiste, il cherche à savoir comment un langage peut

demeurer stable à mesure de ses transmissions successives, malgré la limitation de la "pauvreté du stimulus". Certains langages se révèlent en fait plus faciles à apprendre que d'autres (e.g. un langage compositionnel sera plus facile à apprendre qu'un langage non-compositionnel) ; ceux-ci vont alors jouer le rôle d'attracteurs stables, vers lesquels la dynamique devrait tendre. C'est ainsi qu'émerge, à travers le mécanisme d'apprentissage, et non plus en dépit de celui-ci, une convention linguistique non seulement collective, mais également robuste au travers de la transmission intergénérationnelle.

Les modèles de compétition, quant à eux, s'intéressent à la résolution d'un conflit entre deux variantes linguistiques ; ils décrivent donc une perturbation de la convention linguistique, et la relaxation vers un consensus nouveau et différent du précédent. Dans le modèle d'Abrams-Strogatz, cette compétition est la conséquence d'une mise en contact de deux populations, et met donc en jeu deux langues distinctes ; dans le modèle de sélection des énoncés, il s'agit de deux constructions, ou de deux formes, pour l'expression d'une même fonction, la variation apparaissant dans le système à la suite d'un processus psychologique complexe (Croft, 2000, Chap. IV). Il est à noter que, si les modèles précédents décrivent également un scénario de compétition entre plusieurs langues, plusieurs conventions possibles, ils s'intéressent soit aux questions de l'origine du langage, soit aux questions de son acquisition. Les modèles de compétition proprement dits, et le modèle de sélection des énoncés en particulier, sont donc les seuls à considérer le changement linguistique tel qu'il intervient dans le fonctionnement normal du langage déjà constitué, à travers les pratiques des locuteurs. Le modèle de Bernard Victorri se démarque quant à lui des paradigmes de changement habituels en ce qu'il s'intéresse surtout à la variation lexicale corrélative à la pratique du langage, et ne débouche pas sur un équilibre stable. Il est ainsi l'un des rares modèles à capturer le caractère essentiellement versatile du langage. Cependant, parce qu'il décrit comment les formes peuvent rentrer en compétition pour l'expression des différents sens, il demeure possible de le rattacher à cette dernière catégorie.

### ***3.4. Limitations des modèles numériques actuels***

La grammaticalisation met en jeu le renouvellement du langage, c'est-à-dire le passage d'une convention établie à une autre. Par conséquent, les modèles qui se focalisent sur l'émergence d'une convention fixe et stable entre les locuteurs ne constituent pas de manière immédiate un outil adéquat. Seuls certains modèles d'apprentissage (ceux de Niyogi et Briscoe, essentiellement) et les modèles de compétition sont formulés de manière à permettre la mise en scène d'un tel changement.

Cependant, les modèles générativistes de Niyogi et Briscoe mettent uniquement en jeu des relations syntaxiques ; or, une grammaticalisation ou une lexicalisation peuvent avoir lieu tout en laissant inchangée cette structure de relations. Ces deux changements, en fait, ne peuvent être vus que comme le devenir particulier d'une forme dans le langage, c'est-à-dire, comme la transformation de ses fonctions au fur et à mesure de son usage. Pour pouvoir capturer ce type d'évolution à travers un modèle numé-

rique, il est donc nécessaire de se doter d'une représentation du langage qui explicite l'existence de ces formes. Par ailleurs, les représentations formelles mises en jeu par ce courant se prêtent mal à saisir les nuances fonctionnelles particulières qui permettent de comprendre et de suivre les changements linguistiques qui nous intéressent ici.

Le modèle de sélection des énoncés est plus naturellement orienté vers la représentation de l'évolution diachronique des rapports entre formes et fonctions. Cependant, il est riche d'aspects sociologiques (réseau social, influences diverses et possiblement asymétriques entre les locuteurs, etc.) qui ne se prêtent pas à la comparaison avec les données diachroniques dont nous disposons, et la représentation du langage sur laquelle il s'appuie se limite à mettre en vis-à-vis une fonction unique et un certain nombre de formes candidates à son expression. La question des contextes, dont nous avons vu plus haut qu'elle était cruciale à l'étude du changement linguistique, n'est pas évoquée ; de plus, le fait que le modèle considère une fonction unique ne permet pas de décrire l'acquisition d'une fonction nouvelle par une forme donnée. Ce modèle est néanmoins celui dont nous resterons le plus proches, en termes de représentation.

Nous nous inspirerons également du modèle de Benard Victorri, parce que le sens attaché aux formes s'y démarque utilement des significations exprimées (des *fonctions*, dans notre terminologie) : il s'agit d'objets de même nature, mais qui ne sont pas définis de la même manière. Cette séparation rend possible la description des phénomènes de changement lexical. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte les fréquences d'usage : toutes les formes ont une extension comparable, liée à la normalisation des densités de probabilité qui les définissent. C'est justement ces questions de fréquence que les exemplaires d'occurrences du modèle de sélection des énoncés permettent de prendre en compte.

#### 4. Un modèle du renouvellement linguistique

Nous proposons maintenant une représentation du langage dédiée à l'exploration théorique du renouvellement linguistique. Cette représentation repose sur quatre piliers : 1°) la représentation du contenu informationnel des éléments de l'énoncé par un ensemble de sites d'un graphe complet pondéré ; 2°) une structure d'associations conceptuelles possibles entre ces différents sites ; 3°) des répertoires d'occurrences associés à chacun de ces sites ; 4°) une dynamique associée à ces différents éléments.

A l'instar de (Victorri, 2004), nous représentons en première approche une communauté linguistique par un locuteur unique, qui constitue un équivalent de la description par un agent représentatif utilisée en économie ou de l'approximation de « champ moyen » en physique. Ce locuteur dialogue avec lui-même, de même qu'en première approximation, la communauté linguistique se parle à elle-même. Les aspects sociologiques du changement linguistique sont donc en dehors du cadre de la présente discussion : nous préférons nous focaliser ici sur la dimension cognitive du changement. Il s'agira donc, dans la suite, de décrire la langue de la communauté telle qu'elle s'inscrit dans l'esprit d'un locuteur représentatif.

#### 4.1. *Le langage comme réseau*

Dans une perspective essentiellement sémantique, la représentation du langage comme réseau n'est pas nouvelle (Hudson, 1984) et semble consensuelle (Borge-Holthoefer et Arenas, 2010). Cependant, les représentations en termes de réseau diffèrent souvent par la manière dont elles appréhendent les différents éléments du langage, par le choix de ces éléments, mais aussi par la signification attachée aux liens du réseau (proximité sémantique, réseau de cooccurrences, associations mentales, etc.).

##### 4.1.1. *Sèmes et contextes : caractérisation fonctionnelle des nœuds du réseau*

Les éléments du langage que nous choisissons de représenter par les nœuds du réseau ne sont pas les mots eux-mêmes, mais les unités de signification que peuvent activer ces mots et que nous appellerons les *sèmes*. Ces sèmes se caractérisent par la fonction de communication (Talmy, 2003, pp. 343-344) qu'ils revêtent en intervenant dans un énoncé ; il peut s'agir d'une fonction d'orientation de l'énoncé (négation, situation dans le temps, modalité, etc.) (Chafe, 2002), d'une fonction de dénotation ou d'une fonction discursive. Par ailleurs, l'information correspondant au sème ne se suffit pas à elle-même, mais doit être spécifiée par un *contexte*.

L'acception de ce terme est ici très large : il subsume à la fois les dimensions sociologiques, pragmatiques, discursives, thématiques et linguistiques (sémantiques, syntaxiques, morphologiques, niveau de langue) du contexte. Par exemple, l'étude du remplacement de *moult* par *très* et *beaucoup* (Marchello-Nizia, 2006, Chap. 4) permet de dégager différents traits contextuels pertinents : le comportement syntaxique de *moult* en rend la compréhension difficile ; de nouvelles traditions d'écriture, associées aux codes propres à l'oral représenté, favorisent de nouvelles pratiques ; certains contextes sémantiques permettent l'émergence d'une nouvelle interprétation de *beaucoup* en tant qu'intensifieur ; la classe grammaticale de l'expression intensifiée influe sur le choix entre *très* et *beaucoup* (le premier lié aux catégories adjointes, adverbales et adjectifs, l'autre aux catégories majeures, noms et formes verbales) ; enfin le critère dialectal peut éventuellement entrer en ligne de compte.

Tout cela nous invite à considérer que les caractéristiques fonctionnelles pertinentes des éléments du langage ne sont pas uniquement sémantiques, mais également contextuelles — une distinction qui permet d'ailleurs de différencier efficacement les divers emplois de *très* et *beaucoup*. Pour cette raison, nous agrégeons sème et contexte en un même objet, et nous considérons que les sites pertinents du réseau sémantique ne sont pas seulement sémiques, mais constitués par la conjonction d'un sème et d'un contexte (par exemple et très schématiquement, un couple {intensifieur ; devant adverbe}). Dans la suite, pour désigner un tel objet composite, nous emploierons indifféremment les dénominations *site du réseau* ou *fonction*.

##### 4.1.2. *Représentation formelle des nœuds du réseau*

Reste à résoudre la question, délicate, de la représentation formelle de ces fonctions en vue d'une modélisation. Bien que la notion de fonction, telle que nous l'avons

développée, soit a priori différente de celle de lexème, on pourra néanmoins s’inspirer des travaux effectués dans le domaine plus strictement lexical (Ploux, 2011). Pour définir les composantes sémantiques fondamentales sous-jacentes au sens des différentes formes, on peut par exemple penser aux décompositions schématiques de Leonard Talmy (Talmy, 1978, par ex. fig. (29)). Cependant, nous ne faisons pas ici d’hypothèses sur la nature de l’espace de représentation. Pour le niveau de modélisation auquel nous nous situons, il nous suffit de supposer qu’il est possible de réunir et d’organiser les différentes fonctions grammaticales dans un même espace conceptuel multidimensionnel. Nous optons ici pour une représentation vectorielle, le vecteur associé à une fonction étant appelé son *orientation* — en référence à (Chafe, 2002). Les composantes des vecteurs représentatifs du sens des mots ne sont donc pas supposées avoir une interprétation simple, intuitive. Cet aspect abstrait de la représentation est présent par exemple dans (Mikolov *et al.*, 2013), où le choix des dimensions résulte d’un d’algorithme d’apprentissage. Seulement, dans ces travaux, ce sont les *formes* qui sont représentées, et l’on peut en déduire, par des opérations algébriques, leurs traits sémantiques caractéristiques, eux-mêmes instanciés par des vecteurs (par exemple, on peut retrouver le trait « capitale » en soustrayant le vecteur « France » du vecteur « Paris »). Ici, ce sont les *fonctions* elles-mêmes qui font l’objet de la représentation, le sens des formes étant alors défini à partir d’elles (voir section 4.4). Leur spécification à l’aide d’algorithmes opérant sur corpus reste cependant ouverte.

Nous considérons donc un espace abstrait de traits. Pour simplifier, nous nous limitons à des caractères binaires : l’orientation  $\underline{s}^i$  d’un site  $S_i$  sera représentée par  $H$  traits d’état  $s_h^i$ ,  $h = 1, \dots, H$ , chacun prenant la valeur  $+1$  ou  $-1$  selon que le trait est présent ou absent. La proximité fonctionnelle (ou *adéquation*)  $A(\underline{s}^i, \underline{s}^j)$  entre deux sites  $S_i$  et  $S_j$  est alors définie de manière naturelle par la fraction de traits identiques, ce qui peut s’écrire à partir du produit scalaire entre les orientations :

$$A(\underline{s}^i, \underline{s}^j) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H s_h^i s_h^j \right) \quad [1]$$

Cette quantité, qui varie entre 0 et 1, représente alors le poids associé au lien entre les deux sites  $S_i$  et  $S_j$ . Celle-ci étant définie pour tout couple  $(S_i; S_j)$ , le réseau fonctionnel ainsi construit est sous-tendu par un graphe complet pondéré.

#### 4.2. Associations conceptuelles

En plus de cette proximité fonctionnelle, nous considérons un autre type de liens entre sites, que nous appellerons des *associations conceptuelles* : celles-ci représentent la facilité qu’il y a à naviguer mentalement d’un site à l’autre, notamment par le biais d’inférences. Nous considérons l’association comme indépendante de l’adéquation ; qui plus est, ces associations sont orientées, et peuvent, dès lors, être unidirectionnelles, lorsque la définition de l’adéquation assure une symétrie entre les deux sites. L’existence de ces associations conceptuelles constitue une hypothèse naturelle et neu-



rologiquement fondée (Feldman, 2008, Chap. 7-9), qu'étaye également la découverte de chaînes de grammaticalisation possiblement universelles (Heine et Kuteva, 2002).

Par exemple, il semble exister, chez certains locuteurs du moyen français, une association conceptuelle entre dépréciation de la valeur et quantité : on peut ainsi respectivement inférer des énoncés suivants "mes onques n'oÿ dire que [nos engins] feissent biau cop" (Froissart, in (Marchello-Nizia, 2006, p. 145)) et "Le demourant de ceste journée ne fut point grand chose" (Philippe de Comynnes, *Mémoires*, t.2, 1489) l'idée que les machines siège ont peu d'effet, et que le reste de la journée n'a pas été très riche en événements. Cela ne garantit pas pour autant qu'il y ait proximité fonctionnelle entre l'évaluation subjective de la valeur esthétique de quelque chose, et une appréciation objective de quelque quantité s'y rattachant. Par contraste, il existe une proximité sémantique étroite entre l'évaluation d'une quantité de matière (massique ou dénombrable) et l'évaluation d'une quantité de temps, mais les deux notions ne semblent pas puissamment associées du point de vue de la navigation mentale.

Nous compléterons donc la caractérisation du réseau par une matrice d'association dont les éléments  $\{a_{ij}\}$  encodent la probabilité de transition mentale entre les sites  $S_i$  et  $S_j$ . La structure de cette matrice permettra notamment de définir différentes topologies et d'en observer les effets.

### 4.3. Les répertoires d'occurrences

Jusqu'ici, nous n'avons guère fait que décrire le squelette fonctionnel et conceptuel de la langue, sans évoquer les mots, les constructions qui lui donnent chair.

La connaissance linguistique d'un individu est, dans cette représentation, essentiellement substantivée par sa mémoire : à chaque situation de communication à laquelle il a participé, l'individu s'est retrouvé exposé (par ses propres choix terminologiques comme par ceux des autres participants) à un certain nombre de formes véhiculant chacune un certain contenu informationnel ; à chacun de ces contenus (représentés par les sites du réseau) est donc attaché un répertoire d'*occurrences* des formes avec lesquelles le locuteur s'est trouvé en contact. Ainsi, si, pour un contenu donné, le locuteur s'est trouvé 400 fois en contact avec la forme « A » et 100 fois avec la forme « B », le répertoire comptera 400 occurrences de « A » et 100 de « B ».

Chaque site du réseau est donc caractérisé non seulement par son orientation, mais également par le répertoire d'occurrences qui ont servi à l'exprimer :  $S_i = \{s^i, \{N_\mu^i\}_{\mu=1, \dots, M}\}$ , où  $N_\mu^i$  est le nombre d'occurrences de la forme  $\mu$  enregistrées dans le répertoire du site  $S_i$  et  $M$  le nombre de formes. Par ailleurs, la mémoire d'un individu n'étant pas extensible à l'infini, on la supposera de taille finie ; par commodité, une même taille de mémoire  $L$  sera allouée à chacun des sites du réseau. Cette prise en compte de la mémoire comme constituant majeur de la représentation du langage des individus situe d'emblée celui-ci dans une perspective diachronique ; il sera donc d'autant plus naturel d'y articuler les phénomènes de changement.

#### 4.4. Du point de vue des formes

Notre modèle fait prévaloir le point de vue des fonctions : ce sont elles qui structurent la représentation mentale de la langue. Mais les formes jouent un rôle majeur dans les phénomènes de renouvellement et constituent l'objet central de la grammaticalisation : il est donc nécessaire qu'elles puissent recevoir une spécification dans ce cadre. Une forme se caractérise par les différents usages qu'en font les locuteurs : telle que nous la représentons, elle n'a pas de sens intrinsèque en-dehors de ces usages. Si l'on note  $x_\mu^i$  la fréquence de la forme dans le site  $S_i$  (définie par  $x_\mu^i = N_\mu^i / L$ ), on peut définir le sens de la forme par un vecteur  $\underline{\sigma}^\mu = \{\sigma_h^\mu\}$  évoluant dans le même espace fonctionnel que les orientations des sites, et tel qu'il se dessine à travers les usages qui en sont faits :

$$\underline{\sigma}^\mu = \underset{\underline{\sigma}}{\operatorname{argmax}} \sum_i x_\mu^i A(\underline{s}^i, \underline{\sigma}) \quad [2]$$

où  $\underline{\sigma} = \{\sigma_h\}$  est la donnée de  $H$  traits. Le choix particulier de caractérisation des traits pour lequel nous avons opté entraîne plus précisément que  $\sigma_h^\mu = \operatorname{sgn} \left( \sum_i x_\mu^i s_h^i \right)$ . On définit alors l'adéquation entre une forme et un contenu informationnel spécifique par la fraction de traits identiques (et donc la même formule que [1]).

On peut s'interroger sur les modalités de l'introduction de nouvelles formes dans le système. En effet, pour qu'il y ait compétition, il est nécessaire qu'une forme nouvelle apparaisse dans un répertoire, et entre en conflit avec une forme déjà établie. On trouve dans la littérature plusieurs scénarios possibles : il peut s'agir de la conventionalisation d'une implicature (Nicolle, 1998), ou, de manière proche, être le résultat d'une inférence invitée (Traugott et Dasher, 2001) ; Bernd Heine évoque quant à lui la formation d'un canal conceptuel entre deux contextes (Heine, 2002). Dans tous les cas, nous représenterons cette introduction d'une nouvelle forme par la création d'une association conceptuelle supplémentaire, unidirectionnelle (tous ces mécanismes l'étant explicitement), entre un site du réseau et un site extérieur, réservoir d'occurrences de la forme nouvelle : il s'agit donc d'une forme linguistique déjà établie ailleurs dans la langue, ou émergeant comme une construction à partir de formes existantes (ex. : *ce+pendant* > *cependant*). Le changement est initié par un élément exogène : le présent modèle ne rend pas compte de sa cause.

#### 4.5. Une représentation dynamique

Les objets du modèle étant explicités, on précisera maintenant la dynamique de changement linguistique implémentée. Comme dans les modèles à exemplaires, l'aspect temporel intervient à travers une dynamique de production et d'enregistrement des occurrences, et une mise à jour de la représentation en fonction de ce qui a été perçu et/ou produit. Dans notre modèle, l'état du système, à un moment donné, définit une probabilité de produire une occurrence d'une certaine forme pour un contenu informationnel souhaité ; cette occurrence est ensuite enregistrée et, pour maintenir

la taille de la mémoire fixe et finie, substituée à une ancienne occurrence. Ainsi, les quantités  $N_\mu^i$  varient avec le temps ; de ce fait, le sens des formes est amené, lui aussi, à changer.

De manière plus précise, la dynamique du modèle consiste à itérer un grand nombre de fois la séquence suivante : 1°) choix d'un contenu informationnel à exprimer ; 2°) choix d'une forme pour l'exprimer ; 3°) enregistrement d'une occurrence de cette forme pour ce contenu ; 4°) enregistrement d'occurrences additionnelles ; 5°) écrasement de la trace mnésique d'anciennes occurrences. A chaque itération, les fréquences  $x_\mu^i$  et le sens des différentes formes sont recalculés. Par souci de simplicité, on se placera dans le cas d'une compétition entre deux formes (illustrant, par exemple, le remplacement de *en* par *dans* dans le rôle de préposition locative standard, ou encore, le remplacement du futur simple par le futur proche).

Le choix d'un site, étape 1°), se fait aléatoirement selon une distribution de probabilité uniforme, de même que le choix d'une ancienne occurrence à effacer. A l'étape 3°), on enregistre une occurrence de la forme choisie en 2°) dans le répertoire du site choisi en 1°). Nous ne détaillerons donc que les étapes 2°) et 4°).

#### 4.5.1. *Rôle du locuteur : choix d'une forme*

Pour exprimer un contenu informationnel donné, la forme la plus adéquate est systématiquement privilégiée. Cependant, les processus de recherche et de décision font l'objet de contraintes cognitives, et doivent notamment s'opérer en un temps fini. Cette limitation est modélisée ici par l'existence d'une mémoire de travail où sont temporairement stockées les occurrences suscitées lors de cet effort de recherche. Cette mémoire de travail, entièrement écrasée après chaque utilisation, est caractérisée par une taille  $W$  ; chacun de ses éléments sera recruté selon une certaine probabilité  $P(f_\mu^i)$ , fonction de  $f_\mu^i$ , la *fréquence effective* de la forme  $\mu$  dans le site  $S_i$ , que nous définissons ci-dessous. Une fois que les  $W$  éléments de la mémoire de travail ont été recrutés, on choisit, parmi les différentes formes qui figurent dans cette mémoire de travail, celle qui maximise l'adéquation avec le contenu à exprimer. Notons ici que tous les éléments recrutés peuvent être de la même forme, auquel cas celle-ci sera produite automatiquement.

Nous supposons ensuite que le site choisi, disons  $S_i$ , est sélectionné au terme d'une navigation mentale préalable. La mémoire associée à ce site sera donc parasitée par les occurrences enregistrées dans les répertoires associés aux sites momentanément activés lors de la navigation vers  $S_i$ . Concrètement, cela conduit à remplacer la fréquence  $x_\mu^i$  des formes par une « fréquence effective »  $f_\mu^i$ . Chaque site  $S_j$  est activé avec probabilité  $a_{ji}$  (probabilité de passer de  $S_j$  à  $S_i$ , cf. §4.2) ; on notera alors  $\mathcal{V}_i$  l'ensemble — incluant  $S_i$  — des sites activés à cette occasion. Le calcul de la fréquence effective

tient compte du contenu des répertoires de l'ensemble des sites activés, et pondère leur contribution par l'adéquation avec le site  $S_i$  :

$$f_{\mu}^i = \frac{\sum_{S_j \in \mathcal{V}_i} A(\underline{s}^i, \underline{s}^j) x_{\mu}^j}{\sum_{S_j \in \mathcal{V}_i} A(\underline{s}^i, \underline{s}^j)} \quad [3]$$

Enfin, nous avons opté, dans le cas d'une compétition entre deux formes, pour le choix suivant de la probabilité  $P(f)$  ; elle compare l'avantage d'une forme sur une autre, et traduit cet avantage de manière non-linéaire :

$$P(f) = \frac{1}{2} \left( 1 + \tanh \left( \beta \frac{2f - 1}{\sqrt{f(1-f)}} \right) \right) \quad [4]$$

Cette fonction a la propriété de prendre la valeur 1 (resp. 0) lorsque  $f$  tend vers 1 (resp. 0), et la valeur 1/2 pour  $f = 1/2$ . La non linéarité donne une variation très lente de  $P(f)$  au voisinage de  $f = 0$  et de  $f = 1$  : le choix de l'ancienne forme reste fortement favorisé tant que la nouvelle n'a pas atteint un niveau significatif, et inversement une fois la nouvelle forme très fréquente, elle est privilégiée au delà de sa fréquence réelle. Le paramètre  $\beta$  module la non linéarité (plus forte pour  $\beta$  plus grand).

#### 4.5.2. Rôle de l'allocutaire : enregistrement d'occurrences additionnelles

Si l'innovation apparaît jusque là le fait du seul locuteur, par l'intermédiaire du mécanisme de la fréquence effective, elle peut également être due à l'allocutaire. Celui-ci, en effet, peut inférer plus qu'on ne lui dit ; à ces sens supplémentaires, on fera donc correspondre des occurrences additionnelles de la forme reçue. Ainsi, des occurrences additionnelles peuvent être enregistrées à chaque itération de la dynamique du modèle. Les deux mécanismes, s'ils permettent chacun indépendamment d'aboutir au remplacement partiel d'une forme par une autre, entraînent chacun un effet spécifique : le mécanisme locuteur assure la cohérence d'ensemble du processus de diffusion à travers les sites, le mécanisme allocutaire favorise la coexistence de différentes formes dans un même site à l'équilibre. Combiner les mécanismes permet alors d'obtenir l'une et l'autre de ces caractéristiques, toutes deux observables dans les faits.

Formellement, une certaine forme  $\mu$  ayant été perçue et le contenu informationnel de  $S_i$  ayant été récupéré, un nombre arbitraire de sites peuvent être activés, chacun avec la probabilité  $a_{ij}$  (probabilité d'évoquer  $S_j$  à partir de  $S_i$ ). Dans l'ensemble de ces sites activés, une occurrence supplémentaire de la forme  $\mu$  sera enregistrée avec probabilité  $\max(2A(\underline{s}^i, \underline{s}^j) - 1, 0)$ . En effet, si la proximité sémantique n'est pas significative (c'est à dire si elle est moindre que l'adéquation moyenne entre deux sites aléatoires), on ne considérera pas la forme suffisamment adéquate pour exprimer le contenu informationnel supplémentaire inféré.

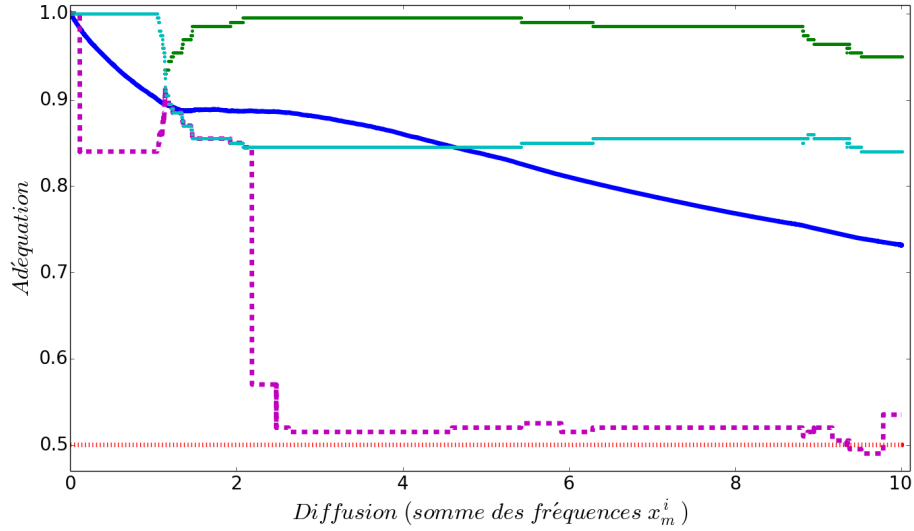
## 5. Emergence du phénomène de javellisation sémantique

Nous illustrons ce modèle par le phénomène de javellisation sémantique (traduction de l'anglais *semantic bleaching* (Givón, 1979, p. 316), initialement proposée par (Lamiroy, 1999)). L'idée de la javellisation sémantique, ou désémantisation, remonte au XIX<sup>e</sup> siècle au moins – (Bréal, 1897), et voir (Hopper et Traugott, 2003, pp. 20-21). Elle consiste à considérer que les formes s'usent progressivement au cours de leur usage, et perdent peu à peu leur couleur, c'est-à-dire leur pouvoir expressif. Dans le cadre de la grammaticalisation, elle prend une importance particulière, car elle est vue comme un phénomène qui favorise le déroulement du processus : une forme qui se grammaticalise perd en spécificité sémantique, et c'est ce qui lui permet de s'adapter à un nombre croissant de contextes différents ; par là, elle diffuse dans le langage, voit sa fréquence augmenter, et se généralise (Bybee, 2003).

Cette vision des choses soulève néanmoins des problèmes, notamment dans le cas des grammaticalisations qui entraînent le remplacement d'une forme par une autre (par exemple le remplacement de *en* par *dans* (Fagard et Combettes, 2013), celui de *moult* par *très* et *beaucoup* (Marchello-Nizia, 2000), ou encore les renouvellements successifs de l'expression du futur, du latin au français). Car, si la forme nouvelle est désémantisée avant de se généraliser, elle n'a plus de pouvoir expressif particulier ; qu'est-ce alors qui pourrait conduire les locuteurs à la préférer à une forme plus attestée, plus fréquente, et cela, contexte par contexte ? Qui plus est, pourquoi une forme perdrait-elle en substance sémantique, avant même de voir son usage évoluer ? Considérer les deux processus de généralisation sémantique et de généralisation contextuelle comme chronologiquement disjoints et causalement reliés semble étouffer toute possibilité de motivation cognitive au renouvellement. Par ailleurs, il est difficile de réconcilier cette idée de javellisation de la forme avec la conception d'un gain sémantique accompagnant la grammaticalisation (Epstein, 1994).

Dans notre modèle, l'évolution sémantique est une résultante intrinsèque de la dynamique, parallèle à l'évolution des usages, les deux s'influençant rétroactivement à chaque itération de la dynamique. Nous illustrons cette émergence du phénomène de javellisation par une simulation dans le cas simple d'une compétition entre deux formes. A l'instant initial, tous les sites du réseau considéré ont leur répertoire saturé par les occurrences d'une forme ancienne, établie ; un site supplémentaire sert de réservoir à la forme nouvelle. La perturbation initiale est liée à la création d'une association conceptuelle unidirectionnelle entre ce réservoir et un site arbitraire du réseau. Au terme de la dynamique, un état stationnaire final est atteint dans lequel les deux formes se partagent les sites du réseau.

Au cours de la simulation, nous mesurons quatre quantités décrivant le comportement fonctionnel de la forme nouvelle, désignée ici par l'indice  $m$  : l'adéquation avec le site réservoir initial :  $A(\underline{\sigma}^m, \underline{s}^0)$  ; l'adéquation maximale :  $\max_{i; x_m^i > 0} A(\underline{\sigma}^m, \underline{s}^i)$  ; l'adéquation minimale :  $\min_{i; x_m^i > 0,1} A(\underline{\sigma}^m, \underline{s}^i)$  ; et l'adéquation moyenne avec les sites qu'elle occupe :  $\sum_i x_m^i A(\underline{\sigma}^m, \underline{s}^i) / \sum_i x_m^i$ . L'évolution de ces quatre quantités est re-



**Figure 1.** Évolution de la fonction d'une forme lors de sa diffusion, présentant l'effet de javellisation sémantique. La diffusion, en abscisse, est quantifiée par la proportion totale d'occupation du réseau ( $\sum_i x_m^i$ ). Pour chaque site, l'adéquation est la fraction de traits identiques avec l'orientation de la forme (voir 4.4). Cyan : adéquation avec le site-réservoir initial ; vert : adéquation maximale ; magenta : adéquation minimale ; bleu : adéquation moyenne sur tous les sites occupés par la forme (somme des adéquations pondérées par la proportion d'occupation). La courbe en pointillés sert de référence : elle correspond à la moyenne de l'adéquation entre deux orientations aléatoires. Paramètres de la simulation : réseau de 30 sites ; nombre d'occurrences mises en mémoire :  $L = 5000$  ; nombre de traits :  $H = 100$  ; taille de la mémoire de travail :  $W = 50$  ;  $\beta = 1$  ; la matrice d'association conceptuelle est définie comme suit :  $a_{ij} = \alpha$  avec  $\alpha = 0.1$  pour toute paire de sites  $S_i$  et  $S_j$  distincts, sauf pour le réservoir  $S_0$  où pour tout  $i$ ,  $a_{i0} = 0$  et  $a_{0i} = \alpha \delta_{i,1}$ . Enfin, pour tout  $i$ ,  $a_{ii} = 1$ . Les orientations des sites sont choisies aléatoirement : pour tout  $i$ , pour tout  $h$ ,  $s_h^i = \pm 1$  avec égale probabilité.

présentée Figure 1, non pas en fonction du temps, mais en fonction de la fraction des sites du réseau occupée par cette nouvelle forme (qui est elle-même croissante avec le temps pour la simulation présentée).

On observe ici le phénomène de javellisation sémantique attendu, consubstantiel à la généralisation des emplois de la forme, et qui se traduit par une décroissance de l'adéquation moyenne. Cependant, la forme reste très adéquate à l'expression du contenu de certains sites (l'adéquation maximale demeure élevée) ; et, d'une manière intéressante, le site pour lequel ce maximum est réalisé est lui-même variable (comme en atteste le décrochage entre adéquation initiale et adéquation maximale) : cela signifie que l'usage prototypique de la forme évolue. On peut donc, en ce sens, parler de gain sémantique, qui n'est alors plus incompatible avec la javellisation en cours.

Enfin, certains usages de la forme sont pauvrement adéquats (l'adéquation minimale n'est guère meilleure, voire moins bonne, que si l'on avait choisi aléatoirement une forme pour exprimer le contenu du site pour lequel elle se réalise).

Ces quatre points reflètent chacun des caractéristiques sémantiques qu'on peut retrouver dans des cas d'évolution réels. Ainsi, la préposition *dans* (Vandeloise, 1986, Chap. 13) avait initialement pour fonction de situer un élément comme s'inscrivant dans une intériorité, le plus souvent de nature charnelle, et d'introduire l'intériorité en question, mais cette dimension n'est plus prégnante : actuellement, la préposition permet plutôt, de manière prototypique, de situer un élément en référence à une localité qui l'englobe partiellement ou intégralement, et, là encore, d'introduire cette localité. Par ailleurs, la fonction de *dans* s'est généralisée, et n'est pas spécifique à cette seule fonction prototypique. Certains emplois de *dans*, bien établis pourtant, semblent même marginalisés par rapport à cette fonction d'ensemble : ainsi, lorsqu'on fixe un rendez-vous « dans un an », l'évènement est situé en-dehors de l'intervalle de temps explicité — par contraste avec l'expression « dans l'année ».

## 6. Conclusion

L'étude du changement linguistique, et tout particulièrement de la grammaticalisation, soulève des questions théoriques nombreuses. Cependant, les modélisations numériques du changement linguistique proposées, si elles permettent de discuter des différentes hypothèses débattues, ne semblent pas à même de décrire correctement les différents phénomènes étudiés en linguistique diachronique ; et en effet, les diverses représentations du langage sur lesquelles elles s'appuient ne s'y prêtent pas, et sont, telles quelles, incompatibles avec la description de ces phénomènes. Dans cette perspective, nous proposons une nouvelle représentation du langage à partir de laquelle il est possible de concevoir différents modèles dynamiques fondés sur les micro-processus cognitifs mis en jeu dans la communication. Nous illustrons cette proposition par une implémentation particulière et une simulation numérique montrant l'effet de javellisation sémantique.

Cette représentation, dont nous avons justifié les éléments par des considérations cognitives, met l'accent sur les effets de fréquence des éléments linguistiques, sur leur dimension fonctionnelle, et sur la structure de l'architecture conceptuelle de la langue. Nous introduisons ainsi un cadre général susceptible de permettre une exploration numérique et mathématique de la question du renouvellement linguistique. Celui-ci offre notamment la possibilité de caractériser quantitativement les phénomènes, et pourra faire l'objet de comparaisons empiriques avec des évolutions réelles, pour peu qu'il soit possible d'extraire de celles-ci des données quantitatives.

## Remerciements

Les auteurs remercient Thierry Poibeau ainsi que les relecteurs anonymes pour leurs commentaires constructifs qui ont conduit à une bien meilleure lisibilité de l'article. QF bénéficie d'une allocation doctorale de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres (PSL).

## 7. Bibliographie

- Abrams D. M., Strogatz S. H., « Linguistics : Modelling the dynamics of language death », *Nature*, vol. 424, n° 6951, p. 900-900, 2003.
- Aitchison J., *Language change : progress or decay ?*, Cambridge University Press, 1991.
- ATILF, « Base textuelle FRANTEXT, <http://www.frantext.fr> », , Site internet, Octobre, 2014.
- Baronchelli A., Loreto V., Tria F., « Language dynamics », *Advances in Complex Systems*, 2012.
- Baxter G. J., Blythe R. A., Croft W., McKane A. J., « Utterance selection model of language change », *Physical Review E*, vol. 73, n° 4, p. 046118, 2006.
- Baxter G. J., Blythe R. A., Croft W., McKane A. J., « Modeling language change : an evaluation of Trudgill's theory of the emergence of New Zealand English », *Language Variation and Change*, vol. 21, n° 02, p. 257-296, 2009.
- Blakemore D., *Semantic Constraints on Relevance*, Blackwell, New York, NY, USA, 1987.
- Borge-Holthoefer J., Arenas A., « Semantic networks : structure and dynamics », *Entropy*, vol. 12, n° 5, p. 1264-1302, 2010.
- Bréal M., *Essai de sémantique : science des significations*, Hachette, 1897.
- Briscoe T., *Grammatical acquisition and linguistic selection*, Cambridge University Press, p. 255-300, 2002.
- Bybee J., *Cognitive processes in grammaticalization*, vol. 2, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., p. 145-167, 2003.
- Campbell L., Janda R., « Introduction : conceptions of grammaticalization and their problems », *Language sciences*, vol. 23, n° 2, p. 93-112, 2000.
- Castellano C., Fortunato S., Loreto V., « Statistical physics of social dynamics », *Reviews of modern physics*, vol. 81, n° 2, p. 591, 2009.
- Castelló X., Baronchelli A., Loreto V., « Consensus and ordering in language dynamics », *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 71, n° 4, p. 557-564, 2009.
- Chafe W., « Putting grammaticalization in its place », *Typological Studies in Language*, vol. 49, p. 395-412, 2002.
- Christiansen M. H., Kirby S., « Language evolution : Consensus and controverses », *Trends in cognitive sciences*, vol. 7, n° 7, p. 300-307, 2003.
- Croft W., *Explaining language change : an evolutionary approach*, Pearson Education, 2000.
- Diewald G., « Context types in grammaticalization as constructions », *Constructions*, vol. 1, p. 1-29, 2006.



- Epstein R., *Development of French Definite Article*, vol. 109, John Benjamins Publishing, p. 81, 1994.
- Fagard B., Combettes B., « De en à dans, un simple remplacement ? Une étude diachronique », *Langue française*, vol. 178, n° 2, p. 93-93, 2013.
- Feldman J., *From molecule to metaphor : A neural theory of language*, MIT press, 2008.
- Fischer O., « On analogy as the motivation for grammaticalization », *Studies in Language*, vol. 32, n° 2, p. 336-382, 2008.
- Fischer O., *Grammaticalization as analogically driven change*, Oxford University Press, p. 31-42, 2011.
- Givón T., *On understanding grammar*, Academic Press, 1979.
- Harris A. C., Campbell L., *Historical syntax in cross-linguistic perspective*, vol. 74, Cambridge University Press, 1995.
- Heine B., « On the role of context in grammaticalization », *Typological Studies in Language*, vol. 49, p. 83-102, 2002.
- Heine B., Kuteva T., *World lexicon of grammaticalization*, Cambridge University Press, 2002.
- Himmelman N. P., *Lexicalization and grammaticization : Opposite or orthogonal ?*, Mouton De Gruyter, p. 21-42, 2004.
- Hopper P. J., Traugott E. C., *Grammaticalization*, second edn, Cambridge University Press, 2003.
- Hudson R., *Word Grammar*, Basil Blackwell, 1984.
- Keller R., « Invisible-hand theory and language evolution », *Lingua*, vol. 77, n° 2, p. 113-127, 1989.
- Kirby S., *Syntax without Natural Selection : How compositionality emerges from vocabulary in a population of learners*, Cambridge University Press, p. 303-323, 2000.
- Kirby S., « Spontaneous evolution of linguistic structure-an iterated learning model of the emergence of regularity and irregularity », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, n° 2, p. 102-110, 2001.
- Kroch A. S., « Reflexes of grammar in patterns of language change », *Language variation and change*, vol. 1, n° 03, p. 199-244, 1989.
- Lamiroy B., « Auxiliaires, langues romanes et grammaticalisation », *Langages*, vol. 135, p. 33-45, 1999.
- Lüdtke H., « Esquisse d'une théorie du changement langagier », *La linguistique*, vol. 22, n° 1, p. 3-46, 1986.
- Marchello-Nizia C., « Les grammaticalisations ont-elles une cause ? Le cas de beaucoup, moult et tres en moyen français », *L'information grammaticale*, vol. 87, n° 1, p. 3-9, 2000.
- Marchello-Nizia C., *Grammaticalisation et changement linguistique*, De Boeck Supérieur, 2006.
- Marchello-Nizia C., *De moult fort à très fort : la 'substitution' comme type de changement linguistique et l'hypothèse des 'contextes propres'*, Gunter Narr Verlag, p. 191-212, 2011.
- Marthelot P., *Karl Bühler : Du contexte à la situation, la signification*, Armand Colin, 2012.
- Melis L., Desmet P., « La grammaticalisation : réflexions sur la spécificité de la notion », *Travaux de linguistique*, vol. 36, p. 13-26, 1998.

- Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J., « Efficient estimation of word representations in vector space », *arXiv preprint arXiv :1301.3781*, 2013.
- Mira J., Paredes Á., « Interlinguistic similarity and language death dynamics », *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 69, n° 6, p. 1031, 2005.
- Nicolle S., « A relevance theory perspective on grammaticalization », *Cognitive linguistics*, vol. 9, n° 1, p. 1-35, 1998.
- Niyogi P., Berwick R. C., « Evolutionary consequences of language learning », *Linguistics and Philosophy*, vol. 20, n° 6, p. 697-719, 1997.
- Nowak M. A., Komarova N. L., Niyogi P., « Evolution of universal grammar », *Science*, vol. 291, n° 5501, p. 114-118, 2001.
- Nowak M. A., Krakauer D. C., « The evolution of language », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 96, n° 14, p. 8028-8033, 1999.
- Pawlowitsch C., Mertikopoulos P., Ritt N., « Neutral stability, drift, and the diversification of languages », *Journal of theoretical biology*, vol. 287, p. 1-12, 2011.
- Peyraube A., « L'évolution des structures grammaticales », *Langages*, vol. 146, p. 46-58, 2002.
- Pierrehumbert J. B., *Exemplar dynamics : Word frequency, lenition and contrast*, vol. 45, John Benjamins Publishing, p. 137-157, 2001.
- Pinker S., « Formal models of language learning », *Cognition*, vol. 7, n° 3, p. 217-283, 1979.
- Ploux S., *Modèles et sémantique lexicale*, Maison des sciences de l'homme, p. 1-18, 2011.
- Prévost S., « La grammaticalisation : unidirectionnalité et statut », *Le français moderne*, vol. 2, n° 71, p. p-144, 2003.
- Puglisi A., Baronchelli A., Loreto V., « Cultural route to the emergence of linguistic categories », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, n° 23, p. 7936-7940, 2008.
- Schelling T. C., *Micromotives and macrobehavior*, WW Norton & Company, 1978.
- Steels L., « A self-organizing spatial vocabulary », *Artificial life*, vol. 2, n° 3, p. 319-332, 1995.
- Steels L., *The talking heads experiment*, Laboratorium, 1999.
- Steels L., « The emergence and evolution of linguistic structure : from lexical to grammatical communication systems », *Connection science*, vol. 17, n° 3-4, p. 213-230, 2005.
- Steels L., « Modeling the cultural evolution of language », *Physics of Life Reviews*, vol. 8, n° 4, p. 339-356, 2011.
- Talmy L., « The relation of grammar to cognition : a synopsis », *Proceedings of the 1978 workshop on Theoretical issues in natural language processing*, Association for Computational Linguistics, p. 14-24, 1978.
- Talmy L., *Toward a cognitive semantics*, vol. 2, MIT press, 2003.
- Traugott E. C., Dasher R. B., *Regularity in semantic change*, vol. 97, Cambridge University Press, 2001.
- Vandeloise C., *L'espace en français : sémantique des prépositions spatiales*, Seuil, 1986.
- Victorri B., « Continu et discret en sémantique lexicale », *Cahiers de praxématique*, vol. 42, p. 75-94, 2004.
- Vogt P., De Boer B., « Language evolution : Computer models for empirical data », *Adaptive Behavior*, vol. 18, n° 1, p. 5-11, 2010.